

## 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Oliver Mack

## Verfahren zur Kalibrierung piezoelektrischer Kraftaufnehmer mit statischen Kräften

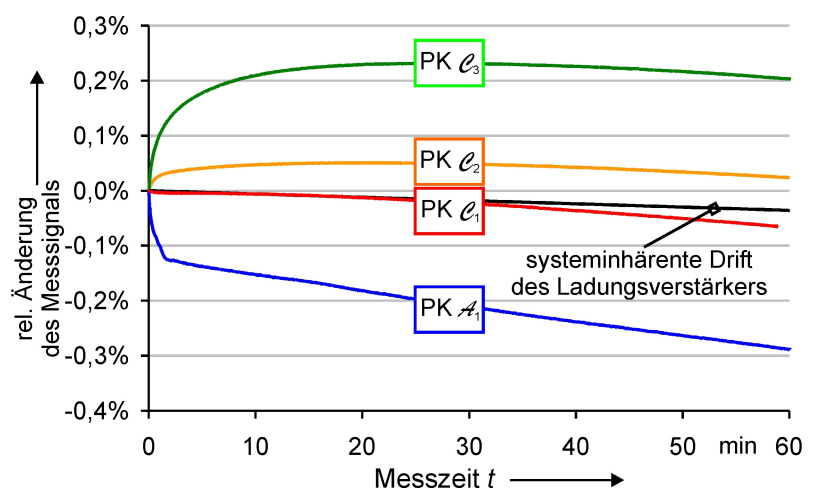
Eine Vielzahl industrieller Anwendungen erfordern Präzisionsmessungen nicht nur statischer, sondern auch kontinuierlicher oder dynamischer Kräfte. Dabei wirken dynamische Einflussfaktoren auf das Messergebnis und tragen zu einer erheblichen Erhöhung der Messunsicherheit bei. Allerdings sind auch für dynamische Präzisionsmessungen weiterhin genaue Kenntnisse der statischen Sensoreigenschaften, wie z.B. das lineare Verhalten und die dynamisch nicht zu verifizierende Wirkung mechanischer Störkomponenten notwendig. Aus diesem Grund werden in der Regel auch für dynamische Anwendungen statisch kalibrierte Kraftaufnehmer eingesetzt.

Piezoelektrische Kraftaufnehmer (PK) sind aufgrund ihrer kleinen Bauformen und hohen mechanischen Steifigkeiten prädestiniert für dynamische Messungen. Das Verhalten von PK unter Wirkung statischer Kräfte und ihre statischen Sensoreigenschaften wie Empfindlichkeit, Linearität, Hysterese, Reproduzierbarkeit und der Einfluss mechanischer Störkomponenten sind jedoch kaum untersucht. Verantwortlich hierfür ist das PK zugrunde liegende aktive Messprinzip. Die durch eine Kraft erzeugte mechanische Energie zur Deformation des Sensorelements wird direkt in elektrische Energie umgewandelt. Endliche Isolationswiderstände führen zu einem exponentiellen Abfall des Messsignals.

PK können zwar in Kombination mit speziellen Ladungsverstärkern für so genannte quasistatische Anwendungen von Interesse sein. Aufgrund einer immer noch vorhandenen linearen Drift des Ladungsverstärkers sind Präzisionsmessungen statischer Kräfte und Kalibrierungen nach den für DMS-Kraftaufnehmer üblichen Kalibrierverfahren nicht möglich. Hinzu kommen sensor-spezifische Einflussfaktoren bei der Be- und Entlastung von PK mit statischen Kräften (Bild 1).

Während einige PK das Driftverhalten des Ladungsverstärkers kaum beeinflussen (PK  $\mathcal{C}_1$ ), führt z.B. PK  $\mathcal{A}_1$  in den ersten Minuten nach der Belastung zu einer wesentlich Erhöhung der Drift. Die PK  $\mathcal{C}_2$  und  $\mathcal{C}_3$  wiederum zeigen trotz einer abnehmenden Drift des Ladungsverstärkers einen nichtlinearen Anstieg des Messsignals, der mehr als 0,05 % (PK  $\mathcal{C}_2$ ) bzw. mehr als 0,2 % (PK  $\mathcal{C}_3$ ) beträgt. Erst nach etwa 30 Minuten wird auch bei diesen PK eine Abnahme des Messsignals beobachtet.

Ein an die speziellen Eigenschaften von PK angepasstes Kalibrierverfahren mit statischen Kräften muss



**Bild 1:** Relative Änderung des Messsignals unterschiedlicher, jeweils mit ihrer Nennlast von 20 kN belasteter PK als Funktion der Messzeit  $t$ . Ebenfalls dargestellt ist die Messsignaländerung aufgrund der systeminhärenten Drift des Ladungsverstärkers.

somit neben einer schnellen, einfachen und umfassenden Charakterisierung der messtechnischen Eigenschaften gewährleisten, dass die lineare Drift des Ladungsverstärkers keinen systematischen Einfluss auf das Messergebnis hat und das Verhalten bei der Be- und Entlastung des PK im Rahmen des Messunsicherheitsbudgets berücksichtigt ist.

Da PK weder Hystereseeffekte noch Nullpunktabweichungen aufweisen, ist ein zur Charakterisierung von DMS-Kraftaufnehmern ungeeigneter Belastungsverlauf mit Pilgerschritten zur statischen Kalibrierung von PK prädestiniert (s. Bild 2).

Die Vorbelastungen am Anfang des Belastungsverlaufs dienen der Reduzierung von Langzeiteffekten und zur Schaffung definierter Betriebszustände des PK.

Die nachfolgende 5minütige Pause gewährleistet, dass sämtliche durch die Vorbelastungen verursachten zeitabhängigen Einflussfaktoren abklingen. Das Be- und Entlastungsverhalten des PK wird zusammen mit der systeminhärenten Drift des

Ladungsverstärkers durch einen Kraftimpuls  $\mathcal{S}_\pi$  der Impulsbreite  $T_\pi = 60$  min und einer anschließenden 60minütigen Entlastungsphase abgeschätzt. Die eigentliche Charakterisierung erfolgt durch drei Pilgerschrittbelastungen  $\mathcal{S}_T''$ , die aus  $8 \leq n_L \leq 10$  aufsteigenden, äquidistanten Laststufen ( $1, \dots, i, \dots, n_L$ ) bestehen. Die Auswertung der Be- und Entlastungsrampe jedes Pilgerschrittes gewährleistet, dass die Drift des Ladungsverstärkers keinen systematischen Einfluss auf das Kalibrierergebnis hat. Zur Berücksichtigung der Wirkung mechanischer Einflussgrößen werden die drei  $\mathcal{S}_T''$  in  $n_{\text{Rot}} \geq 2$  weiteren Einbaustellungen innerhalb der Prüfeinrichtung wiederholt. In Übereinstimmung zur Norm ISO 376, nach der DMS-Kraftaufnehmer in der PTB kalibriert werden, erfolgt der Einbau des PK dazu um jeweils  $\varphi_{\text{Rot}} = 360^\circ / (n_{\text{Rot}} + 1)$  Grad gedreht in einer Prüfeinrichtung.

Ein spezielles Auswerteverfahren erlaubt erstmals die Bestimmung der Übertragungskoeffizienten von PK mit statischen Kräften, bei denen der lineare Driftanteil des Ladungsverstärkers keinen systematischen Einfluss auf das Kalibrierergebnis hat. Somit haben die Lastwechselzeiten und die Messzeiten zur Auswertung der Be- und Entlastung jedes Pilgerschrittes weder einen Einfluss auf den Übertragungskoeffizienten noch auf den Messunsicherheitsbeitrag.

Für die untersuchten PK werden relative, erweiterte Messunsicherheiten ( $k = 2$ ) zwischen  $7,3 \cdot 10^{-4}$  und  $1,4 \cdot 10^{-3}$  erzielt. Diese Unsicherheiten sind bis zu einer Größenordnung kleiner als die von Herstellern mit kontinuierlichen Kalibrierverfahren erzielten Ergebnisse. Damit liefert das neue Verfahren einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von PK. Darüber hinaus lassen sich verschiedene Aspekte des Verfahrens möglicherweise auch auf standardisierte, statische Kalibrierverfahren für Drehmoment-, Druck oder Beschleunigungsaufnehmer übertragen.

#### Autorenangabe:

Dipl.-Phys. Oliver Mack

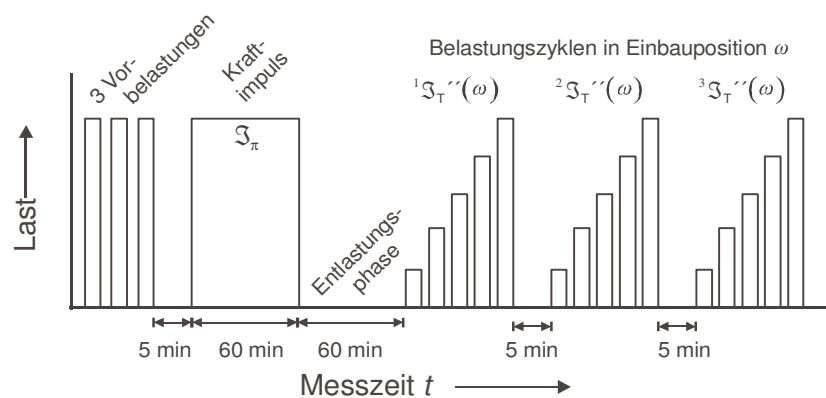
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Tel.: +49-531-5921143

Fax: +49-531-5921105

E-mail: Oliver.Mack@ptb.de



**Bild 2:** Belastungsverlauf des neu entwickelten Kalibrierverfahrens zur Untersuchung von PK mit statischen Kräften